

Toc toc toc ! En frappant à la porte, on la fait vibrer. Le mouvement, imperceptible à l'œil nu, crée dans l'air environnant une alternance de surpressions et de dépressions locales qui se propagent à 340 mètres par seconde et atteignent nos oreilles. La vibration engendre ainsi une onde sonore, c'est-à-dire un « son ». Les caractéristiques de l'onde conditionnent en grande partie le son perçu. Par exemple, la fréquence d'oscillation de l'onde détermine si le son est aigu ou grave. Les différents paramètres physiques de l'objet vibrant, tels sa forme et le matériau dont il est fait, régissent la vibration. Ainsi, nous distinguons les yeux fermés un objet en verre d'un autre en bois au simple son qu'ils produisent lorsqu'on les frappe.

Il en va de même pour la table d'harmonie d'une guitare, d'un violon ou d'un piano. Mise en vibration grâce aux cordes, elle est la source principale du son de l'instrument, comme la membrane d'un haut-parleur ou la peau d'un tambour. La table d'harmonie de l'instrument étant un objet tridimensionnel complexe, sa vibration est riche et ne produit pas une fréquence unique, mais tout un ensemble de fréquences. Celles-ci sont caractéristiques d'un instrument : c'est pourquoi le son d'une guitare se distingue de celui d'un piano, même quand on y joue la même note.

Lors de la fabrication de l'instrument, l'art du luthier consiste, pour une part, à optimiser les modes de vibrations de la table d'harmonie, pour en obtenir le son qu'il attend. L'artisan intervient alors sur la forme de la table, les matériaux qui la composent et les « barrages » (des baguettes de bois raidisseuses placées sous la table). Le luthier est capable d'identifier à l'oreille le bon accordage de la table ; son savoir-faire le guide pour obtenir le son désiré.

Cependant, il pourrait lui être utile de visualiser les formes vibratoires de la table (on parle aussi de ses « modes ») qui se manifestent à une fréquence précise. Il aurait alors une connaissance objective des caractéristiques vibratoires impliquées dans le son de l'instrument.

Pour parvenir à cette identification, des dispositifs existent, mais ils sont chers, lents et difficiles à mettre en place. Est-il possible de développer un outil performant et utilisable par le luthier ? Avec des collègues acousticiens, mathématiciens et informaticiens, nous avons utilisé une

■ LES AUTEURS

Nancy BERTIN est chargée de recherche CNRS à l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (Irisa) de Rennes.

Laurent DAUDET est professeur à l'Institut Langevin de l'Université Paris-Diderot.

Rémi GRIBONVAL est directeur de recherche Inria à l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (Irisa) de Rennes.

François OLLIVIER est maître de conférences à l'Institut d'Alembert de l'Université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.

technique novatrice de traitement du signal, l'« holographie acoustique compressée », pour visualiser rapidement et de façon fiable les vibrations d'un instrument de musique. La procédure consiste en plusieurs étapes : enregistrer le son de l'instrument, identifier les fréquences auxquelles il vibre et, pour chacune d'elles, analyser le champ acoustique pour reconstruire la forme vibratoire associée.

Pour le luthier, voir la forme vibratoire de la table d'harmonie serait une aide afin de l'accorder avant son assemblage, par exemple en optimisant la position des barrages pour renforcer ou atténuer certaines vibrations.

Le phénomène de vibration est complexe, car il dépend de nombreuses caractéristiques physiques et géométriques de la structure. Cependant, des résultats classiques de mécanique montrent que l'on peut décomposer la vibration d'une structure en une somme – une « superposition » – de vibrations élémentaires, nommées « modes propres » (voir l'encadré page 40), chacune étant associée à une fréquence spécifique.

Pour visualiser et identifier les modes propres d'une structure vibrante, deux moyens sont couramment utilisés : le calcul numérique et l'analyse expérimentale. La modélisation numérique est assez facile à mettre en œuvre, mais les résultats qu'elle produit dépendent de paramètres souvent mal maîtrisés, tels que les propriétés élastiques des matériaux (d'une grande variabilité en lutherie) et la nature de la liaison entre la table d'harmonie et son support. C'est pourquoi la méthode expérimentale est la plus adaptée pour mesurer directement la vibration et en identifier les modes propres. Comment procéder ?

Voir les vibrations, un problème ancien

Les premières études sur les vibrations et leur visualisation remontent aux travaux des physiciens allemands Ernst Chladni (1756-1827) et August Kundt (1839-1894). Le premier a étudié cette question en saupoudrant des plaques de métal avec de fines particules de poussière (voir page 43). Depuis, de nombreux progrès ont été réalisés dans ce domaine et l'industrie utilise couramment des systèmes de visualisation des vibrations à des fins de diagnostic en mécanique des structures. Les vibrations sont en effet source de

L'ESSENTIEL

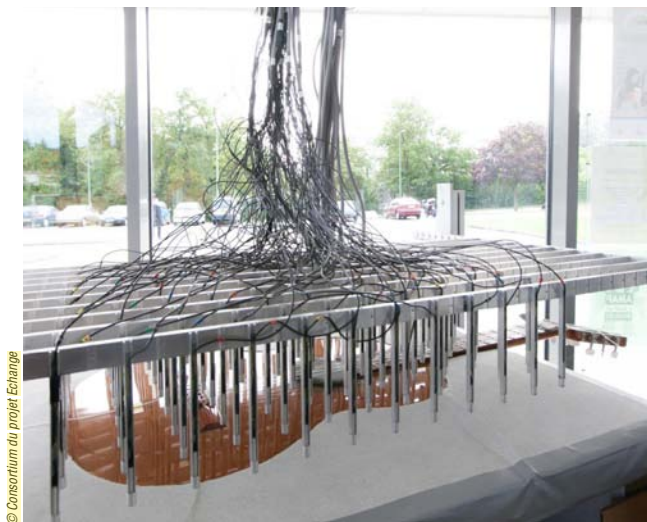
■ Les luthiers s'appuient sur un savoir-faire traditionnel pour évaluer le son des instruments qu'ils perçoivent et façonnent à l'oreille.

■ Des systèmes de mesure des vibrations existent pour compléter ce savoir-faire, mais ils sont lourds et coûteux.

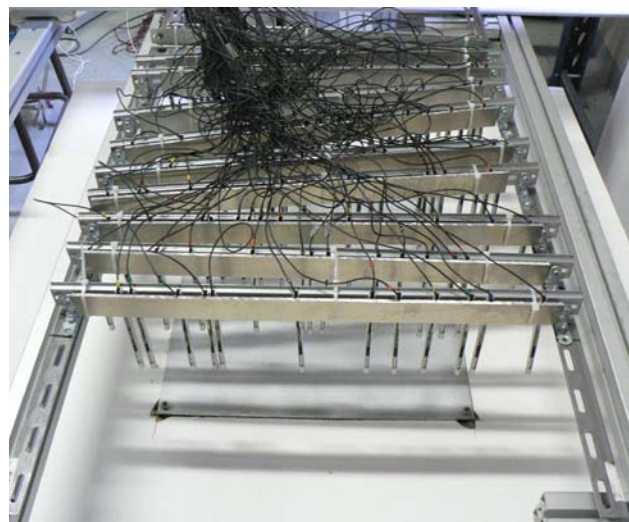
■ Des chercheurs ont développé une technique de visualisation rapide et fiable des modes de vibration : l'holographie compressée.

■ Cette technique associe des outils récents de plusieurs disciplines : mathématiques, informatique, acoustique et traitement du signal.

Page précédente : © shutterstock/Arak Ratanavittakorn



© Consortium du projet Exchange



bruit, mais aussi de contraintes mécaniques susceptibles de fragiliser et de détériorer les objets. Dans ce contexte, visualiser les vibrations permet de les comprendre pour mieux les supprimer.

Pour les visualiser, il existe une méthode très précise, mais coûteuse : la vibrométrie laser à balayage. Ce capteur scanne la structure vibrante avec un faisceau laser. Le principe est le même que celui des radars de contrôle routier. En vertu de l'effet Doppler-Fizeau, la structure en mouvement engendre un décalage de fréquence du faisceau laser réfléchi. La mesure de la différence de fréquence permet ainsi de calculer la vitesse de vibration au point visé.

À l'issue du balayage, le champ vibratoire étant entièrement mesuré, une méthode d'analyse mathématique – l'analyse modale – est mise en œuvre pour identifier les fréquences propres et les modes propres associés.

Des méthodes lentes et coûteuses

Mesurer la vitesse en un point prend plusieurs secondes. Ainsi, le balayage de la table avec un maillage centimétrique nécessite plusieurs heures (typiquement plus de huit heures pour une structure d'environ un mètre carré). En outre, la mise en œuvre de la vibrométrie laser nécessite un matériel lourd et coûteux (le prix d'une très belle voiture de sport!).

En 2006, une équipe de chercheurs américains a utilisé cette technique pour étudier trois violons anciens d'une valeur inestimable. La prouesse est remarquable,

mais la méthode reste inaccessible au luthier dans son travail quotidien.

Il existe une autre façon d'obtenir une carte des vibrations de la table d'harmonie. Observons le geste du luthier : il tapote la planche de bois et écoute le son résultant. La vibration est trop rapide et d'amplitude trop faible pour qu'il puisse l'observer à l'œil nu. C'est bien son oreille, un extraordinaire instrument d'analyse du son, qui le guide. L'holographie acoustique de champ proche s'inspire de la technique du luthier : écouter le son produit, reconstruire la carte des vibrations, l'analyser et visualiser les modes propres.

Cette technique a été proposée au début des années 1980 par le physicien Julian Maynard, de l'Université d'État de Pennsylvanie, et ses collègues. Elle fait appel à un ensemble de microphones constituant une « antenne » acoustique. Celle-ci est disposée à quelques centimètres de la structure, que l'on fait vibrer à l'aide d'un coup de marteau contrôlé, comme pour la vibrométrie laser. Tous les micros de l'antenne enregistrent simultanément l'onde sonore produite, depuis leurs positions respectives. En utilisant un modèle mathématique de propagation de l'onde, on remonte le temps en effectuant numériquement la propagation du son « à l'envers » – la rétropropagation – jusqu'à déterminer les vibrations de la table d'harmonie de l'instrument qui ont créé le son.

Le principe de cette opération acoustique est analogue à celui de l'holographie optique, dans la mesure où l'image enregistrée dans un plan et un modèle de propagation de la lumière permettent

À L'ÉCOUTE DES VIBRATIONS.

Des microphones sont disposés au-dessus de l'instrument (*à gauche*) ou de la plaque de métal (*à droite*) dont on veut étudier les vibrations. Grâce aux modèles de propagation du son, l'enregistrement permet de reconstituer la carte des vibrations de l'objet. Pour la plaque rectangulaire, de forme régulière, un positionnement aléatoire des microphones est plus efficace. Pour la guitare, dont la table d'harmonie a une forme complexe, une disposition régulière des microphones suffit.